

ÇİMENTODA ÖZGÜL YÜZEY ALANI İLE TANE BOYU DAĞILIMI İLİŞKİSİNİN İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMESİ

Statistical Evaluation of Specific Surface Area and Particle Size Distribution Relationship for Cement

Geliş (received) 17 Nisan (April) 2009; Kabul (accepted) 15 Mayıs (May) 2009

Aylin GÜLTEPE(*)
Gül ERGÜN(**)

ÖZET

Bu çalışmada, Blaine yöntemiyle belirlenen yüzey alanı ve tane boyu dağılımı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çimento fabrikalarından alınan 196 örneğin boyut dağılımları lazer kırınımı yöntemiyle, özgül yüzey alanları ise, Blaine yöntemiyle belirlenmiştir. Boyut dağılımını ifade etmek üzere belirli bir boydan ince malzeme miktarı ve belirli bir miktarda malzemenin ince olduğu tane boyu kullanılmış ve bunların özgül yüzey alanı ile ilişkisi istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Boyut dağılımının d_{20} değeri ve $3\mu\text{m}$ den ince malzeme miktarı, verilen bir boyut dağılımından Blaine özgül yüzey alanının tahmininde uygun bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Çimento, Özgül yüzey alanı, Tane boyut dağılımı, Lazer kırınımı yöntemi, Blaine yöntemi

ABSTRACT

This study investigated the relationship between the specific surface area and particle size distribution of cement. 196 samples from cement plants were collected and specific surface area and particle size distribution were determined by Blaine and laser diffraction methods, respectively. The relationship between specific surface area determined by Blaine method and size distribution descriptors such as % passing from certain size and particle size which certain amount of material passes were statistically evaluated. It was found that d_{20} of the size distribution and the amount of material passing from $3\mu\text{m}$ are suitable parameters for estimating Blaine specific surface area of the cement from its size distribution.

Keywords: Cement, Specific surface area, Particle size distribution, Laser diffraction method, Blaine method

(*) Maden Y. Mühendisi, Yeni Anadolu Min. Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti., Aşağı Öveçler 06460, Ankara.

(**) Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi Fen Fak., İstatistik Bölümü, Beytepe 06800, Ankara, gul@hacettepe.edu.tr

1.GİRİŞ

Çimentonun özgül yüzey alanı beton dayanımını belirleyen en önemli parametrelerden biridir (Hewlett, 1998; Tsivilis vd, 1990; Kuhlmann vd,1985; Ellerbrock vd, 1990; Skvara vd, 1981; Cleeman, 1980; Osbaeck ve Johansen, 1989; Zhang ve Napier-Munn, 1995; Sumner vd, 1989; Svinning vd, 2007; Hwang vd, 2004). Çimentonun inceliği arttıkça , özgül yüzey alanı ve öğütmede özgül enerji tüketimi artmaktadır. İstenen kalitede öğütme devresinin en yüksek kapasitede çalıştırılması, en düşük maliyet ve en yüksek karlılık için önemli olmaktadır.

Çimento öğütme devrelerinde boyut dağılımlarının gerçek zamanlı ölçümünün olabilişine rağmen (Malcomson ve Holve, 1998; Godek, 2000; Kalkert, 2000), çok sayıda çimento fabrikasında ürün kalitesinin kontrolünde ve öğütme devresinin işletilmesinde, Blaine yöntemiyle (TS EN 196-6, 2000) belirlenen özgül yüzey alanı (BYA) ve genellikle 90 µm ve 45 µm eleklerin üzerinde kalan malzeme miktarı kullanılmaktadır. Buna karşın, BYA gerçekleşen boyut küçültme ve sınıflandırıcı işlemlerinin verimliliği hakkında bir bilgi vermemektedir. Bu işlemlerin verimliliğinin ölçümünde boyut dağılımlarının kullanılması gerekmektedir.

Ayrıca, çimentoda öğütme devrelerinde harcanan özgül enerji tüketiminin azaltılması için, modelleme ve simülasyon teknikleri artan oranda kullanılmaktadır (Touil vd, 2006; Austin vd, 1975; Austin vd, 1976; Austin vd, 1984; Viswanathan ve Narang; 1988; Zhang vd, 1988; Lynch vd, 2000; Benzer vd (a) , 2001; Benzer vd (b), 2001; Jankovic vd, 2004; Boulvin vd, 1998). Bu teknikler kullanılarak yapılan çalışmaların sonuçları boyut dağılımları olarak elde edilmektedir.

Sonuç olarak, çimento fabrikalarında kullanılmaya devam edilen BYA ile boyut dağılımlarının ilişkilendirilmesi, büyük miktarda enerji tüketen çimento öğütme devrelerinin optimum çalıştırılabilmesi için önemli olmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmaların sonuçları, çimento öğütme devrelerinde çalışan mühendis ve operatörler tarafından daha rahat algılanabilir bir hale gelecektir.

Boyut dağılımı ile BYA'yı ilişkilendirmek üzere kürenin yüzey alanı ve şekil faktörüne dayanan yaklaşımlar önerilmiş olmasına (Zhang ve Napier-

Munn, 1995; Sumner vd, 1989; Kuhlmann, 1984; Tsivilis ve Tsimas, 1992; Deckers ve Ellerbrock, 1981) ve bunların bir bölümünün lazer kırınımı yöntemiyle boyut dağılımının belirlenmesi için kullanılan cihazların yazılımlarının içinde bulunmasına rağmen (Kalkert, 2000; Frias vd, 1991; Bandopadhyay vd, 1999) genel kabul görmüş bir yaklaşım bulunmamaktadır. Bunun yanısıra, Tsivilis ve Tsimas (1992) tane boyut dağılımını ifade etmek için, yaygın olarak kullanılan Rosin-Rammler-Bennet fonksiyonunun parametrelerini BYA ile ilişkilendiren bir çalışma yürütmüştür.

Bu çalışmanın amacı, boyut dağılımıyla BYA arasındaki ilişkinin incelenmesi ve kabul edilebilir duyarlılıkta bir eşitlik geliştirilmesidir. Türkiye'de çeşitli fabrikalardan alınan 196 adet çimento örneğinden elde edilen veriler kullanılarak, öncelikle küre yüzey alanı ve şekil faktörüne dayanan yaklaşımlar sınanmış ve daha sonra istatistiksel teknikler kullanılarak ampirik ilişkiler araştırılmıştır. Rosin-Rammler-Bennet ve Gates-Gaudin-Schuhmann dağılımları, alınan örneklerin boyut dağılımlarını ifade etmekte yetersiz bulunduğundan, çalışma kapsamından çıkarılmıştır.

2.TANE BOYU İLE ÖZGÜL YÜZEY ALANI İLİŞKİSİ

Küresel tanelerden oluşan bir toz örneğinin birim ağırlık başına yüzey alanı Eşitlik 1'le hesaplanabilir (Hewlett, 1998).

$$\text{ÖYA} = \frac{6}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{x_m} \quad (1)$$

Küresel olmayan taneler için şekil faktörü kullanılarak eşitlik aşağıdaki biçime dönüşmektedir (Eşitlik 2).

$$\text{ÖYA} = \frac{6}{\rho} \cdot \varphi \cdot \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{x_m} \quad (2)$$

ÖYA : Tozun özgül yüzey alanı (cm²/gr)

ρ : Tanelerin yoğunluğu (g/cm³)

w_i : i.boyut fraksiyonun ağırlık oranı

x_{mi} : x_i ve x_{i+1} boyut fraksiyonlarının ortalama tane boyu (cm)

φ : Şekil düzeltme faktörü

Bir boyut fraksiyonu için ortalama tane boyu ise, aşağıdaki eşitlikler yardımıyla farklı şekillerde ifade edilebilir:

$$\text{Aritmetik ortalama, } x_a = \frac{(x_i + x_{i+1})}{2} \quad (3)$$

$$\text{Geometrik ortalama, } x_g = (x_i \cdot x_{i+1})^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{Harmonik ortalama, } x_h = \frac{2 \cdot x_i \cdot x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} \quad (5)$$

Herdan (1953) tarafından verilen harmonik

$$\text{ortalama, } x_z = \left[\frac{(x_i^2 + x_{i+1}^2)(x_i + x_{i+1})}{4} \right]^{1/3} \quad (6)$$

Kuhlmann (1984), Eşitlik 1'i kullanmış ve $[\text{ÖYA}_{\text{hesaplanan}} = a + b \cdot \text{ÖYA}_{\text{ölçülen}}]$ biçiminde bir ampirik eşitlik önermiştir. Sumner vd (1989), Denklem 2'yi kullanmış ve şekil düzeltme faktörünü 1.1-1.15 arasında olduğunu belirlemiştir. Lazer kırınımıyla boyut dağılımı belirleme cihazı yazılımında da, Eşitlik 2 kullanılmaktadır (Kalkert, 2000). Ortalama tane boyu tanımı olarak Kuhlmann (1984) ve Sumner vd (1989), Eşitlik 4'ü, Zhang ve Napier-Munn (1995) ise, Eşitlik 6'ya kullanmıştır. Zhang ve Napier-Munn (1995), bu eşitlikleri karşılaştırmış ve Eşitlik 6 kullanılarak hesaplanan ÖYA'nın ölçülen değerlere daha yakın olduğunu belirlemiştir.

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Deneysel çalışmalarda farklı çimento fabrikalarından alınan farklı tiplerde toplam 196 adet ticari çimento örneği kullanılmıştır.

Boyut dağılımları lazer kırınımı yöntemiyle kuru olarak ölçülmüştür. Örnekler ölçümden önce 80 °C'de bir saat kurutulmuş ve olası nemden uzaklaştırılmıştır. Tüm ölçümler üç kez tekrarlanmıştır. Örneklerin BYA'sı ilgili standart kullanılarak belirlenmiştir (TS EN 196-6, 2000). Yöntemin tekrarlanabilirliğini belirlemek üzere

boyut dağılımları ince, iri ve ortalamayı temsil eden üç örnek seçilmiş ve bu örneklerin yüzey alanı ölçümleri 25 kez tekrarlı olarak yapılmıştır. Bu ölçümlerin sonuçları Çizelge 1'de verilmektedir.

Çalışmada kullanılan çimento örneklerinin tipleri ve BYA aralıkları, Çizelge 2'de verilmektedir. Örneklerin boyut dağılımları ise, Şekil 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. BYA Ölçümlerinin Tekrarlanabilirliği (cm²/g)

	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3
Ortalama	4327	3768	3315
S. Sapma	39	41	47
Maksimum	4413	3867	3428
Minimum	4251	3654	3214

Birinci grup portland çimentosu örnekleri(OPC-1) farklı çimento fabrikalarından, diğer örnekler ise, belirli bir fabrikadan alınmıştır.

4.BOYUT DAĞILIMLARI KULLANILARAK BYA'NIN HESAPLANMASI

Eşitlik 3-6'da verilen farklı ortalama tane boyutu tanımları ve Eşitlik 1 kullanılarak, her örnek için BYA hesaplanmıştır. Burada, geometrik ortalama (Eşitlik 4) ve harmonik ortalama (Eşitlik 5) kullanıldığında elde edilen değerler ölçülen değerlerden oldukça büyük tahmin edilmiştir.

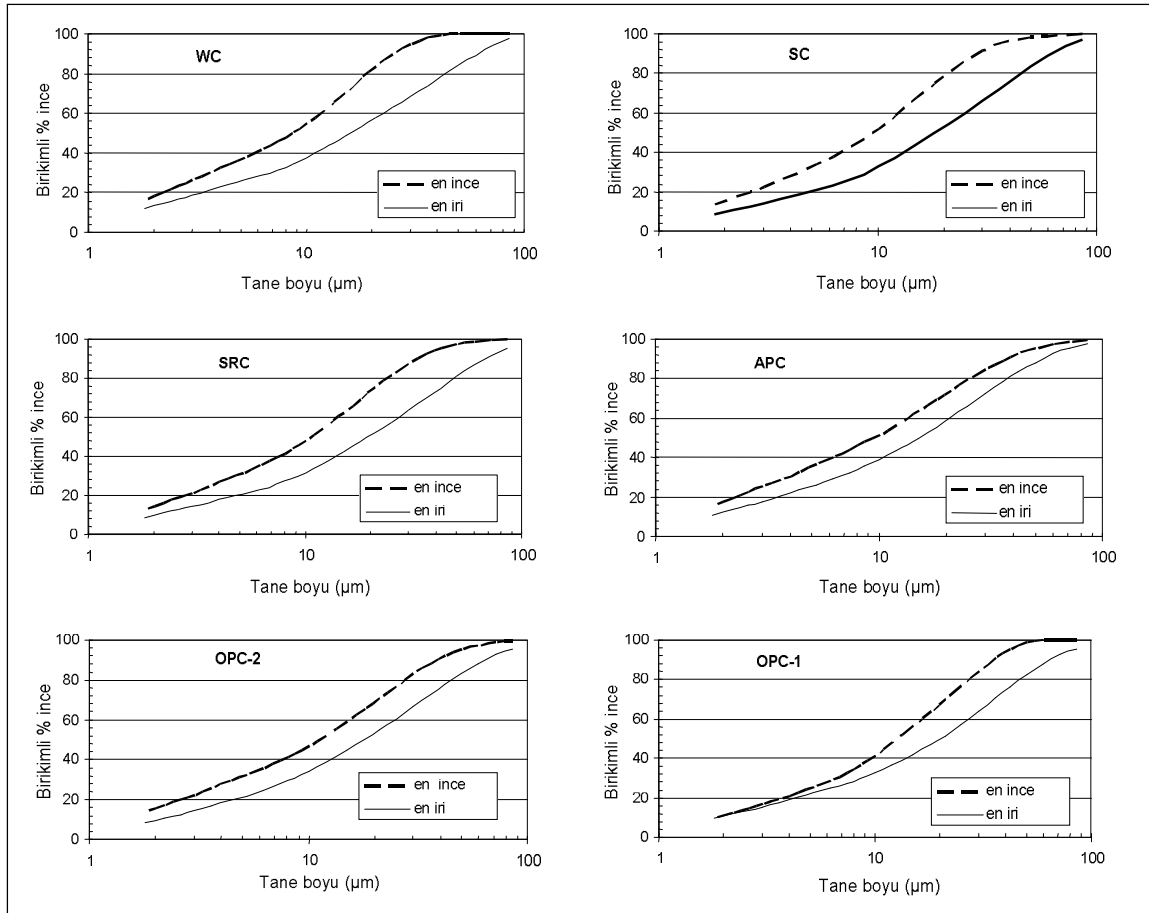
Çalışmada, Eşitlik 1 kullanıldığında farklı ortalama tane boyutu tanımları için elde edilen uyumun nicel ifadesinde, Eşitlik 7 ile tanımlanan ortalama mutlak sapma (OMS) değeri baz alınmış ve hesaplanan bu değerler Çizelge 3'de verilmiştir.

$$\text{OMS} = \frac{\sum_i^n |(BYA_{\text{ölçülen}_i} - BYA_{\text{hesaplanan}_i})|}{n} \quad (7)$$

Eşitlik 2 düzenlenerek şekil düzeltme faktörü her bir örnek için Eşitlik 8 yardımıyla hesaplanmış ve her bir çimento tipi için, bu değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

Çizelge 2. Çalışmada Kullanılan Çimento Tipleri ve BYA Aralıkları

Çimento Tipi	Örnek Sayısı	Ortalama	BYA(cm ² /g)	
			Maksimum	Minimum
Beyaz Çimento (WC)	12	4140	5460	3182
Cürüflü Çimento (SC)	9	3937	4815	3043
Sülfata Dayanıklı Çimento (SRC)	19	3339	4403	2832
Katkılı Çimento (APC)	31	4895	5552	3779
Portland Çimentosu (OPC-1)	59	3397	3911	2833
Portland Çimentosu (OPC-2)	66	3431	3946	2844
Toplam	196			



Şekil 1. Çalışmada kullanılan çimento örneklerinin boyut dağılımı (sade bir gösterim için sadece en iri ve en ince boyut dağılımı verilmiştir)

$$\varphi = \frac{SSA(\text{ölçülen})}{\left(\frac{6}{\rho}\right) \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{x_m}} \quad (8)$$

Eşitlik 2 kullanılarak, Eşitlik 3-6'da verilen farklı ortalama tane boyutu tanımları için, BYA değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan OMS değerleri yukarıda Çizelge 3' te verilmiştir.

Çizelge 3'ten izlenebileceği gibi, genel olarak Eşitlik 1 kullanıldığında Eşitlik 6 ile verilen ortalama tane boyutu ifadesi en düşük OMS değerini vermektedir. En düşük OMS değeri, OPC-2 örnekleri için 123 cm²/g olarak bulunmuştur. OPC-2 örnekleri %95 klinker ve % 5 alçıdan oluştuğu için tek bileşenli bir

çimentoya yaklaşmaktadır. OPC-1 örnekleri de aynı bileşime sahip olmasına karşın farklı fabrikalarda farklı döner fırınlarda üretildikleri için daha yüksek OMS değerine sahiptir. APC örnekleri farklı gözenek ve pürüzlülüğe sahip puzolanik malzeme içerdiğinden daha yüksek OMS değeri vermiştir.

Şekil düzeltme faktörüyle birlikte Eşitlik 2 kullanıldığında, farklı ortalama tane boyutu tanımlamalarından kaynaklanan fark ortadan kalkmıştır. En yüksek ve en düşük OMS değerleri, sırasıyla 203 cm²/g ve 103 cm²/g dir. BYA ölçümlerinin hassasiyeti düşünüldüğünde, tüm ortalama boyut dağılımı ifadelerinin benzer sonuçlar verdiği söylenebilir.

Çizelge 3. Farklı Ortalama Boyut Tanımları Kullanılarak Hesaplanan OMS Değerleri

Çimento Tipi	Ortalama Tane Boyutu	OMS(Eşit.(1))	φ	OMS(Eşit.(2))
WC	Eşit.3	585	0,872±0,015	199
	Eşit.4	3872	0,515±0,008	186
	Eşit.5	11221	0,269±0,004	179
	Eşit.6	236	0,970±0,017	203
SC	Eşit.3	528	0,879±0,013	143
	Eşit.4	3519	0,527±0,007	146
	Eşit.5	10205	0,278±0,004	148
	Eşit.6	167	0,973±0,015	142
SRC	Eşit.3	591	0,849±0,007	103
	Eşit.4	3151	0,515±0,005	108
	Eşit.5	8875	0,274±0,003	128
	Eşit.6	220	0,937±0,008	106
OPC-1	Eşit.3	656	0,839±0,004	115
	Eşit.4	3350	0,504±0,003	117
	Eşit.5	9378	0,267±0,002	125
	Eşit.6	265	0,929±0,005	115
OPC-2	Eşit.3	416	0,893±0,005	119
	Eşit.4	2951	0,540±0,003	118
	Eşit.5	8619	0,287±0,002	122
	Eşit.6	123	0,986±0,005	120
APC	Eşit.3	184	0,963±0,006	141
	Eşit.4	3767	0,565±0,003	129
	Eşit.5	11792	0,293±0,002	121
	Eşit.6	355	1,073±0,007	145

5. FARKLI TİPTE ÇİMENTOLAR İÇİN BOYUT DAĞILIM PARAMETRELERİ İLE BYA İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

Tane boyutu dağılımının karakterizasyonu için kullanılan Rosin-Rammler-Bennet ve Gates-Gaudin-Schuhmann ifadeleri bu çalışmada elde edilen boyut dağılımlarına iyi bir uyum

göstermemişlerdir. Bu çalışmada, belirli oranda (x) malzemenin geçtiği tane boyutu (d_x), belirli bir boydan geçen malzeme miktarı (P_x), tane boyutu dağılımı eğrisinin doğrusal kısmının eğimini temsil eden parametre (D_x) ve türetilen G parametreleri kullanılmış ve Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 4. Boyut Dağılımını Karakterize Etmek İçin Kullanılan Parametreler

Çizelge 4. Boyut Dağılımını Karakterize Etmek İçin Kullanılan Parametreler

Açıklama	Aralık					
	WC	SC	SRC	OPC-1	OPC-2	APC
d_{50} Malzemenin % 50 sinin geçtiği tane boyutu (μm)	16-9	18-9	20-11	20-12	18-14	15-9
d_{20} Malzemenin % 20 sinin geçtiği tane boyutu (μm)	4-2	5-3	5-3	5-3	5-3	4-2
d_{90} Malzemenin % 90 sinin geçtiği tane boyutu (μm)	61-25	72-30	68-36	68-36	60-50	50-36
P_{30} 30 μm 'den ince malzeme miktarı(%)	95-68	92-68	88-63	84-64	75-66	85-72
P_{21} 21 μm 'den ince malzeme miktarı(%)	84-58	81-54	75-52	70-52	63-55	74-60
P_{10} 10 μm 'den ince malzeme miktarı(%)	55-37	52-33	48-32	44-31	40-33	52-39
$P_{7,4}$ 7,4 μm 'den ince malzeme miktarı(%)	46-30	43-26	40-26	38-25	33-27	45-32
P_3 3 μm 'den ince malzeme miktarı(%)	26-16	23-14	21-14	22-13	18-14	26-18
D_1 $(d_{75}-d_{25})/2d_{50}$	1,02-0,74	0,96-0,76	1,05-0,66	1,10-0,70	0,99-0,71	1,10-0,82
D_2 $(d_{90}-d_{20})/d_{50}$	3,84-2,39	3,96-2,51	3,75-2,04	4,49-2,34	3,64-2,69	4,44-3,07
D_3 (d_{90}/d_{20})	20-10	17-10	17-7	22-8	17-12	20-14
G $(P_{30}-P_3)$	69-50	69-51	70-49	66-48	58-52	61-55

BYA'nın boyut dağılım parametreleri ile ilişkisi, Pearson Korelasyon Katsayısı yardımıyla hesaplanmış ve önemli bulunan ilişkiler, Çizelge 5'te verilmiştir. d_x parametreleri BYA ile negatif korelasyon verirken, d_{90} en zayıf korelasyonu vermiştir. Diğer korelasyonlar %99 güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Farklı tipte çimentolar için en yüksek R^2 değerini veren eşitlikler, Çizelge 6 verilmiştir.

Çizelge 5. Boyut Dağılımı Parametreleri ve BYA İlişkisi

	Pearson Korelasyon Katsayıları					
	WC	SC	SRC	OPC-1	OPC-2	APC
d_{50}	-0,903	-0,990	-0,886	-0,635	-0,638	-0,969
d_{20}	-0,903	-0,948	-0,884	-0,872	-0,778	-0,964
d_{90}	-0,637	-0,978	-0,470	-0,07	-0,184	-0,733
P_{21}	0,909	0,997	0,783	0,501	0,564	0,929
P_{10}	0,956	0,982	0,948	0,792	0,737	0,968
$P_{7,4}$	0,963	0,969	0,948	0,849	0,774	0,970
P_3	0,964	0,968	0,930	0,866	0,780	0,954

Çizelge 6. Farklı Çimento Tipleri İçin En İyi Uyum Veren Eşitlikler (Şekil 2)

Çimento tipi	BYA(cm ² /g)	R ²	OMS (cm ² /g)
WC	1408,2×e ^{0.0516P₃}	0,945	146
SC	67,772×P ₂₁ - 645,78	0,993	41
SRC	91,667×P ₁₀ - 87,475	0,899	107
OPC-1	-399,59×d ₂₀ + 4932,3	0,761	97
OPC-2	166,68×P ₃ + 756,03	0,610	116
APC	11452×d ₂₀ ^{-0,8853}	0,956	111

6.BOYUT DAĞILIMI PARAMETRELERİYLE BYA İLİŞKİSİNİN TÜM VERİLER İÇİN İNCELENMESİ

Her çimento tipi belirli bir boyut dağılımı ve BYA aralığına sahip olduğu için, genel bir ilişkiyi araştırmak üzere tüm veriler birlikte değerlendirilmiştir. Tüm veriler için boyut dağılım parametreleri ile BYA ilişkisi Şekil 3'te verilmektedir. Burada en yüksek korelasyonu d₂₀ vermiştir. P₃ parametresi de iyi bir uyum göstermektedir. İri boyları temsil eden d_x ve P_x parametrelerinde, korelasyon azalmaktadır. Çimento dayanımı için belirleyici olduğu belirtilen (Tsvilis vd, 1990; Kuhlmann vd,1985, Cleeman, 1980), 30 µm ve 3 µm arasındaki malzeme miktarını ifade eden G parametresi BYA ile iyi bir korelasyon vermemiştir.

Çimento fabrikalarında yaygın olarak kullanılan boyları temsilen 86 µm ve 42 µm'den ince malzeme oranı da Şekil 3'de verilmiştir. Her iki parametre de BYA ile önemli bir korelasyon göstermemiştir.

Şekil 3'de verilen d₂₀-BYA ve P₃-SSA ilişkilerinin matematiksel ilişkisi farklı ifadeler kullanılarak değerlendirilmiştir. En iyi uyumun bulunduğu modeller, Eşitlik 9 ve 10' da verilmektedir.

$$BYA = 1760,21 \times 13,184^{(1/d_{20})} \quad (9)$$

$$BYA = 1436,89 \times 1,054^{(P_3)} \quad (10)$$

Verilere daha iyi uyum gösteren başka bir eşitlik araştırmak amacıyla, Eşitlik 9 ve 10'un artıkları hesaplanarak Çizelge 4'te verilen parametrelerle ilişkileri incelenmiştir. Çalışılan aralıkta, Eşitlik 9 ve 10'a yeni değişkenlerin eklenmesi uyumu iyileştirmemiştir.

Eşitlik 2 ve Eşitlik 3-6 ile verilen ortalama tane boyutu ifadeleri kullanılarak tüm veriler için BYA değerleri de hesaplanmıştır. Her ortalama boyut dağılımı ifadesi için şekil düzeltme faktörü yukarıda açıklandığı şekilde Eşitlik 8 kullanılarak belirlenmiştir.

Tüm eşitlikler için OMS değerleri, Çizelge 7'de verilmiştir. Buna göre, Eşitlik 9 en iyi uyumu vermiştir. BYA ölçümlerinin standart hatası düşünüldüğünde uyumların kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7. Eşitlik 9 ve 10 Kullanılarak Hesaplanan Ortalama Mutlak Sapma Değerlerinin Farklı Ortalama Boyut İfadeleriyle Bulunan Değerlerle Karşılaştırılması

	OMS (cm ² /g)	φ
Eşitlik (3)	197	0,882±0,004
Eşitlik (4)	183	0,529±0,002
Eşitlik (5)	179	0,279±0,009
Eşitlik (6)	202	0,976±0,005
Eşitlik (9)	151	-
Eşitlik (10)	168	-

7.TARTIŞMA

Farklı ortalama tane boyutu ifadeleriyle Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan BYA değerlerinin farklı çıkmasının temel nedeninin, en ince fraksiyon için hesaplanan yüzey alanının farklı olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan en ince fraksiyon olan -1.8+0.1µm fraksiyonu için ortalama tane boyutu değerleri Çizelge 8'de verilmiştir. Ortalama tane boyutu Eşitlik 1'in paydasında yer aldığı için, Eşitlik 4 ve 5 kullanılarak hesaplanan yüzey alanı, Eşitlik 3 ile hesaplanan yüzey alanının sırasıyla 2.24 ve 5.01 katı olmaktadır.

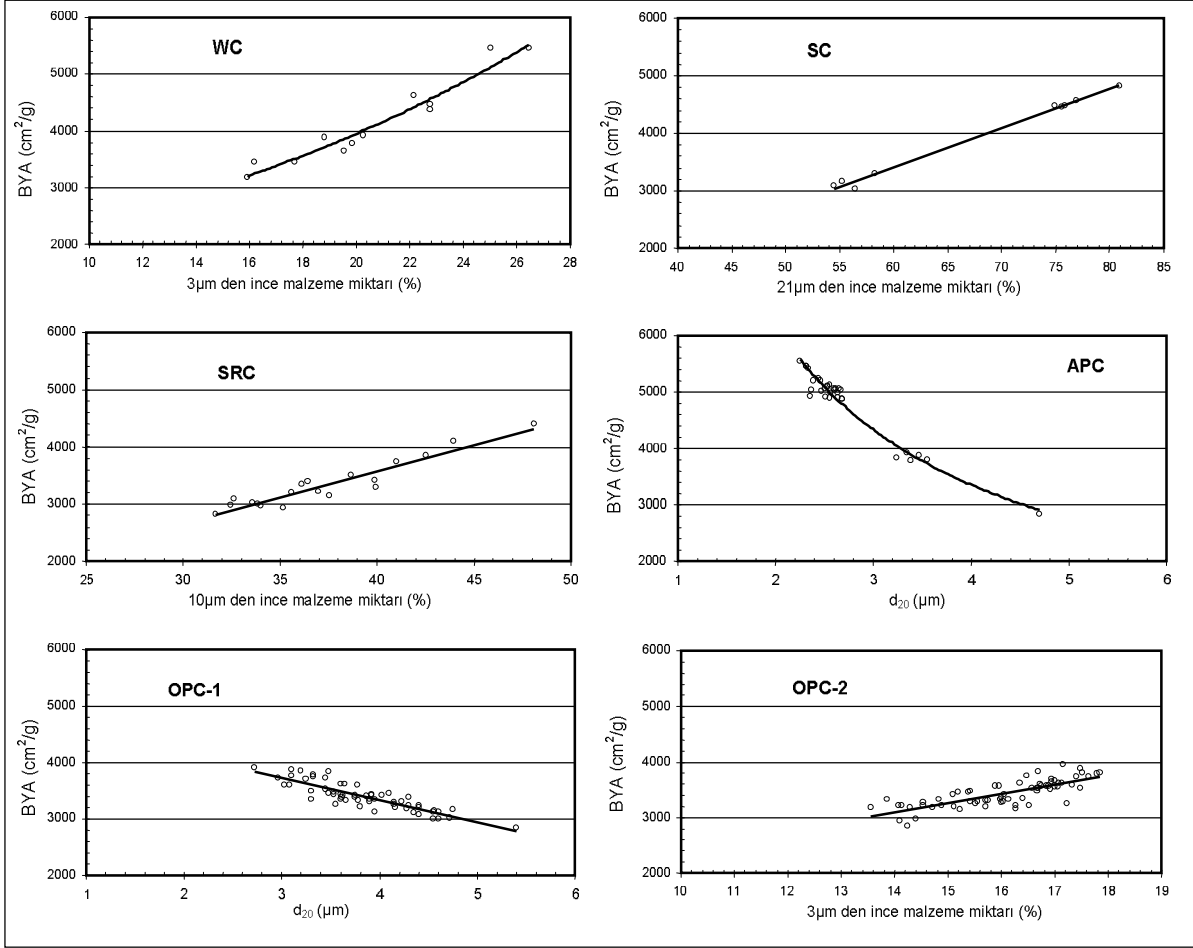
Çizelge 8. Farklı Eşitlikler Kullanılarak Hesaplanan Ortalama Tane Boyutu Değerleri

Fraksiyon(µm)	Hesaplanan ortalama boyut(µm)			
	Eşit. (3)	Eşit. (4)	Eşit. (5)	Eşit. (6)
-1,8+0,1µm	0,95	0,42	0,19	1,16

Eşitlik 2 kullanıldığında, her çimento tipi için

belirlenen şekil düzeltme faktörlerinin portland çimentosu örnekleri (OPC-1 ve OPC-2) için bile büyük ölçüde değiştiğinden her çimento tipi için ayrıca hesaplanması gerekmektedir. Bu durum, gerçek zamanlı boyut dağılımı için de

önerilmektedir (Kalkert, 2000). Zhang ve Napier-Munn'ın (1995), "ortalama tane boyutunun belirlenmesi için Eşitlik 6'nın Eşitlik 4'e göre daha iyi sonuç verdiği" şeklindeki değerlendirmesi bu çalışmada farklı çimento türleri için geçersiz bulunmuştur.



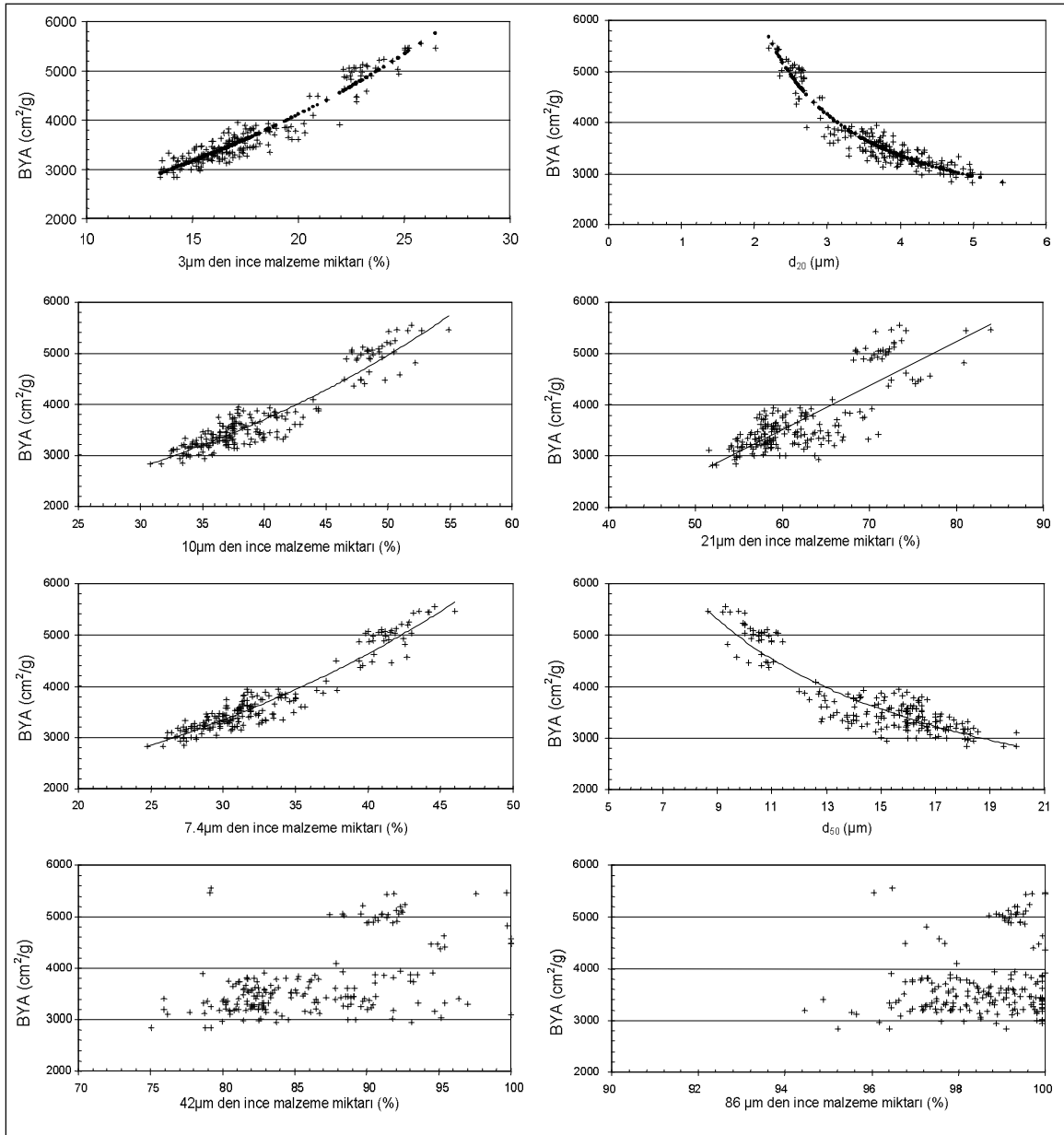
Şekil 2. Farklı çimento tipleri için boyut dağılımı parametreleri ile BYA arasındaki ilişki

Bunun yanısıra, şekil düzeltme faktörlerinin ölçülen BYA değerleriyle arttığı bulunmuştur. Eşitlik 3 ve 6 için hesaplanan şekil düzeltme faktörleri BYA ile daha yüksek korelasyon vermektedir. Sonuçlar burada sunulmamakla birlikte her bir çimento tipinde de benzer durum gözlenmiştir. Bu noktadan hareketle, şekil düzeltme faktörünün çimento inceliğinin bir fonksiyonu olduğu yorumunu yapmak mümkün görünmektedir.

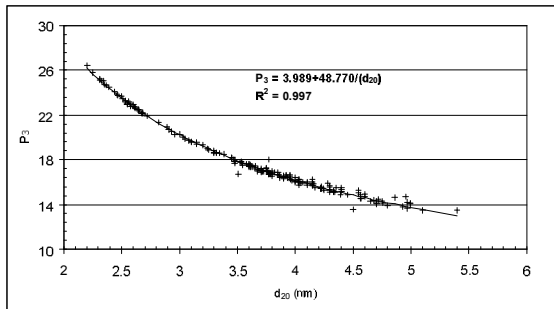
Bu çalışmada önerilen ampirik denklemler, genellikle Eşitlik 2'ye oranla verilere daha iyi uyum göstermiştir. Çizelge 6'dan görülebileceği

gibi, farklı tipte çimentolar için en iyi uyumu veren eşitlik değişmektedir. Bu durum, geliştirilecek ampirik ilişkinin, üretim yapılan tesise ve çimento tipine göre değişebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan veri sayısı en fazla olan portland çimentosu için gözlenen ilişki doğrusal olmuştur.

Tüm veriler gözönüne alındığında, d₂₀ ve P₃ parametrelerinin diğer d_x ve P_x parametrelerinden daha iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 4'den görüleceği gibi bu iki parametre arasında da çok yüksek bir korelasyon bulunmaktadır.

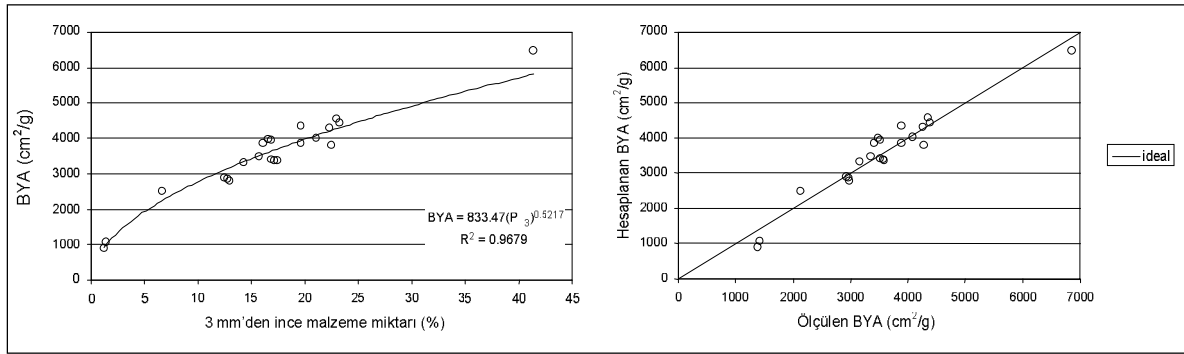


Şekil 3. Tüm veriler için boyut dağılımı parametreleri ile BYA ilişkisi



Şekil 4. d_{20} ve P_3 parametreleri arasındaki ilişki

Boyut dağılımı ve BYA arasındaki ilişkiyi sınamak için literatürde Tsivilis vd (1990) tarafından yayınlanan veriler kullanılmıştır. En yüksek korelasyon P_3 parametresi ile bulunmuş ve Şekil 5'te sunulmaktadır. Şekil 5'te gösterilen uyumun OMS değeri $241 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, birikimli tane boyut dağılımı eğrisinin eğimini ifade eden D_x parametresinin diğer d_x ve P_x parametreleriyle birlikte kullanılması elde edilen uyumu iyileştirmemiştir. En iri tane boyutu aynı olan iki dağılımda eğimin değişmesi her fraksiyonda bulunan malzeme



Şekil 5. P_3 parametresi ile BYA ilişkisi (Veriler Tsivilis vd, 1990'dan alınmıştır).

miktarını değiştireceğinden BYA üzerine etkili olması beklenmektedir. Bununla birlikte, aynı malzeme ve öğütme devresinden elde edilen boyut dağılımlarının eğimlerinin her zaman değişmesi beklenmemektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan ticari örnekler kontrollü öğütme devrelerinde üretildiklerinden, tane boyut dağılımının etkisinin maskelenmiş olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tane boyut dağılımından belirlenecek d_{20} veya P_3 parametrelerinin BYA'nın kabul edilebilir duyarlılıkta belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu şekilde, çimento öğütme devrelerinin modelleme simülasyon yardımıyla optimizasyonunda işlem değişkenlerinin etkilerinin fabrikalarda kullanılan en önemli kalite ölçütlerinden biri olan BYA ile ilişkisi kurulmuş olmaktadır.

8.SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen temel bulgular şunlardır:

Bir çimento örneğinin BYA'sı büyük ölçüde ince taneler tarafından belirlenmektedir.

Ortalama tane boyut dağılımının hesaplanmasında, en düşük OMS değeri veren ve ölçülen BYA ile en düşük korelasyona sahip Eşitlik 5'in kullanılması uygun bulunmuştur.

Portland çimentosu için, boyut dağılımı parametreleriyle BYA arasında doğrusal ilişki olacağı ve OMS değerinin $100 \text{ cm}^2/\text{g}$ düzeyinde olacağı belirlenmiştir.

Boyut dağılımı bilinen bir çimento örneğinin BYA değeri, Eşitlik 8 veya 9 kullanılarak OMS değeri $200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'den düşük olacak şekilde belirlenebilmektedir.

Boyut dağılımı ve BYA arasındaki ilişki tesise, çimento tipine ve boyut dağılımı belirlemek için kullanacak ekipmana bağlı olmaktadır.

KAYNAKLAR

Allen, T., 1990; "Particle Size Measurement", Chapman and Hall, 4th Edition, 598.

Austin, L.G., Klimpel, R.R. ve Luckie, P.T., 1984; "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", AIME Publ., NY, 260–291, 458–470.

Austin, L.G., Luckie, P.T. ve Seebach, H.M.W., 1976; "Optimization of a cement milling circuit with respect to particle size distribution and strength development, by simulation models", Fourth European Symposium Zerkleinern, Dechema Monographien, Verlag Chemie, Weinheim, 519–537.

Austin, L.G., Luckie, P.T. ve Wightman, D., 1975; "Steady state simulation of a cement milling circuit", Int. J. Miner. Process., 2, 127–150.

Bandopadhyay, S.K., S. Roy, S. ve Ghosh, S.N., 1999; "Comparative investigations into the determination of cement fineness by Blaine permeability and laser granulometry", ZKG International, 52 (12), 693–696.

Benzer, H., Ergün, L., Lynch, A.J., Öner, M., Günlü, A., Çelik, İ. ve Aydoğan, N., 2001; "Modeling cement grinding circuits", Miner. Eng., 14(11), 1469–1482.

Boulvin, M., Vande Wouwer, A., Renotte, C. ve Remy, M., 1998; "Some observations on modeling and control of cement grinding circuits", Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania, 3018–3022.

Cleeman, J.O., 1980; "Ways to control particle size distribution for ground product", Particle Technology, Europ. Sympos., Amsterdam, Proc. A. S. 23–48.

- Deckers, R. ve H. G. Ellerbrock, H.G., 1981; "Uniform representation of particle size distributions", *Zement-Kalk-Gips*, **34 (11)**, 573-579.
- Ellerbrock, H.G, Sprung, S. ve Kuhlmann, K., 1990; "Particle size distribution and properties of cement Part III: influence of the grinding process", *Zement-Kalk-Gips* (**3**) (Translation of No. **1(90)**), 13-19.
- Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Luxán, M.P. ve García, N., 1991; "Determination of specific surface area by the laser diffraction technique. Comparison with the Blaine permeability method", *Cement and Concrete Research*, **21(5)**, 709-717.
- Godek, A.R., 2000; "On line particle size analyzer" at Ash Grove's Leamington Utah Plant", *Cement Industry Technical Conference, 2000 IEEE-IAS/PCA*, 289 – 298.
- H. Benzer, L. Ergün, M. Öner, A.J. Lynch, 2001; "Simulation of open circuit clinker grinding", *Miner. Eng.*, **14 (7)**, 701–710.
- Hewlett, P.C., 1998; "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th Edition, Arnold Publishing Co., 380.
- Hwang, K., Noguchi, T. ve Tomosawa, F., 2004; "Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete", *Cement and Concrete Research*, **34**, 2269-2276.
- Jankovic, A., W. Valery, W. ve Davis, E., 2004; "Cement grinding optimisation", *Minerals Engineering*, **17**, 1075–1081.
- Kalkert, P., 2000; "Online Blaine measurement - experience with using the online particle sizer in a cement works", *ZKG International*, **53 (8)**, 474-477.
- Kuhlmann, K., 1984; *Zement-Kalk-Gips*, **37**, Translation No: **9(84)**, 257.
- Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G. ve Sprung, S., 1985; "Particle size distribution and properties of cement Part I: strength of portland cement", *Zement-Kalk-Gips* (**6**) (Translation of No. **4(85)**), 169-178.
- Lynch, A.J., Öner, M. ve Benzer, H., 2000; "Simulation of closed cement grinding circuit", *ZKG*, **53(10)**, 560–564.
- Malcolmson, A.P. ve Holve, D.J., 1998; "In-line particle size measurements for cement and other abrasive process environments", *IEEE/PCA 40th Cement Industry Technical Conference*, 411-423.
- Osbaeck, B. ve Johansen, V., 1989; "Particle size distribution and rate of strength development of portland cement", *Journal of the American Ceramic Society*, **72 (2)**, 197–201.
- Skvara, F., Kolar, K., Novotny, J. ve Zadak, Z., 1981; "The effect of cement particle size distribution upon properties of pastes and mortars with low water-to-cement ratio", *Cement and Concrete Research*, **11 (2)**, 247-255.
- Sumner, M.S., Hephher, N.M. ve Moir, G.K., 1989; "The influence of a narrow cement particle size distribution on cement paste and concrete water demand", *Ciments, Betons, Plâtres, Chaux*, **778 (3)**, 164-168.
- Svinning, K., Høskuldsson, A. ve Justnes, H., 2007; "Prediction of compressive strength up to 28 days from microstructure of Portland cement", *Cement Concrete Composites*, (doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.05.016).
- Touil, D., Belaadi, S. ve Frances, C., 2006; "Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill", *Cement and Concrete Research*, **36**, 416-421.
- TS EN 196-6, (07.03.2000), Türk Standartı, Çimento Deney Metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini.
- Tsivilis, S. ve Tsimas, S., 1992; "Estimation of the specific surface of the cement industry materials according to their particle size distribution", *Zement-Kalk-Gips*, **45(3)**, 31-134.
- Tsivilis, S., Tsimas, S., Benetatou, A. ve Haniotakis, E., 1990; "Study on the contribution of the fineness on cement strength", *Zement-Kalk-Gips*, **43(1)**, 26-29.
- Viswanathan, K. ve Narang, K.C., 1988; "Computer simulation and optimisation of ball mills/circuits", *World Cement*, **19**, 143–148.
- Von G. Herdan, V.G., 1953; "Small Particle Statistics", Elsevier Publishing Company, 520.
- Zhang, Y. ve Napier-Munn, T.J. ve Kavetsky, A., 1988; "Application of comminution and classification modeling to grinding of cement clinker", *Trans. Inst. Min. Metall.*, **97**, 207–214.
- Zhang, Y.M. ve Napier-Munn, T.J., 1995; "Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength", *Powder Technology*, **83**, 245-252.